DOI: 10.11858/gywlxb.20230826

爆轰加载下 TATB 基钝感炸药的冲击-卸载-再冲击实验装置设计与模拟

樊 辉, 刘 坤, 谷 岩, 孙占峰

（中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999）

摘要: 在一些特殊的工程应用和意外事故中，炸药内部可能会受到多次冲击压缩和卸载作用从而使其起爆性能发生变化，因此，需要一种可以模拟多次冲击和卸载的实验加载装置，用以研究炸药在复杂载荷下的起爆响应。基于爆轰加载原理，提出并设计了一种可以实现完全卸载的冲击-卸载-再冲击的爆轰加载实验装置，利用数值模拟对该装置进行了仿真设计和参数优化，并通过实验验证了数值模拟的准确性和装置设计的可行性。结果表明：利用所设计的爆轰加载装置驱动钨镁双层飞片撞击 TATB 基钝感炸药，通过调整装置中的间隙宽度，可以对炸药实现完全卸载的冲击-卸载-再冲击加载，为后续研究炸药在复杂载荷多次冲击下的起爆响应提供了一种新的实验技术。

关键词: 冲击-卸载-再冲击；爆轰加载；TATB 基钝感炸药

中图分类号: O521.3; O383 **文献标志码:** A

在各种军事和民用领域，炸药装置的性能受到格外关注。在一些涉及复杂时序起爆的工程问题，或炸药受到意外冲击的事故情景中，可能有多个激波在足够接近的空间和时间维度撞击炸药，导致炸药发生多次冲击压缩和卸载。这种复杂的冲击载荷会使炸药的冲击起爆响应发生变化，从而影响炸药装置系统的稳定性和可靠性[1−2]。因此，研究复杂载荷条件下炸药的冲击到爆轰（shock to detonation transition, SDT）响应过程，对于理解多次冲击起爆的物理机制以及工程设计具有重要的现实意义。

关于炸药多次冲击的研究最早可追溯到 1960 年，Campbell 等[3] 首次发现塑性黏结 HMX 炸药经过 3.9 GPa 预冲击后，在随后的 10.0 GPa 冲击下无法起爆。这种特殊的现象被定义为“冲击脱敏”，即弱激波的通过使炸药对随后的强激波失去敏感性，与原始的、未受冲击的材料相比，经过预冲击后的炸药变得更加钝感。此后，Campbell 等[4] 和 Setchell[5] 针对 PBX-9404 炸药研究了预冲击压力、波形以及时间对冲击脱敏效果的影响，Campbell 等根据实验数据提出了预冲击压力（p）与 PBX-9404 脱敏所需时间（τ）之间的关系为 $p^{2.2}\tau$=1 150 (0.1 GPa)$^{2.2}$·μs; Setchell 则研究了不同预冲击波形和时间下炸药的冲击敏感性变化。针对炸药多次冲击的研究在很长一段时期内都仅局限于上述连续的双冲击起爆[6−8]。随着工程应用问题的日益复杂化，更贴近现实场景的不连续的、伴随卸载波的多次冲击下炸药的起爆响应逐渐受到重视。在最近的研究中，Finnegan 等[9] 和 Aslam 等[10] 通过气炮加载平台驱动 3 层组合式飞片撞击炸药，成功模拟了冲击-卸载-再冲击加载过程，但是在气炮加载下，受限于飞片的平面支撑性，卸载波传入炸药内部后仍然具有一定的压缩载荷，难以实现完全卸载，与实际工程场景不符。因此，寻求一种更贴近工程实际、可以实现完全卸载的冲击-卸载-再冲击实验装置至关重要。

本研究选择 TATB 基高能钝感炸药为待测样品炸药，基于爆轰加载技术，设计一种通过炸药爆轰驱动双层飞片以实现冲击-卸载-再冲击加载历史的实验装置；通过数值模拟对主要装置参数进行设计

* **收稿日期:** 2023-12-21； **修回日期:** 2024-01-19

作者简介: 樊 辉（1999—），男，硕士，主要从事炸药起爆性能研究. E-mail: fanhui2939@163.com

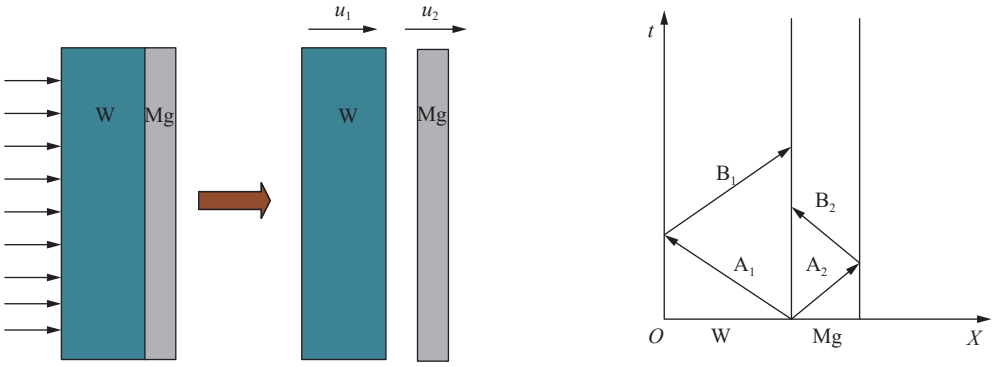
通信作者: 孙占峰（1976—），男，博士，研究员，主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: sunzf7695@163.com

优化，分析装置间隙对飞片速度的影响，并对该实验装置进行具体的实验验证，以证明爆轰加载装置设计的有效性。

1　爆轰加载实验装置设计

1.1　冲击-卸载-再冲击加载原理

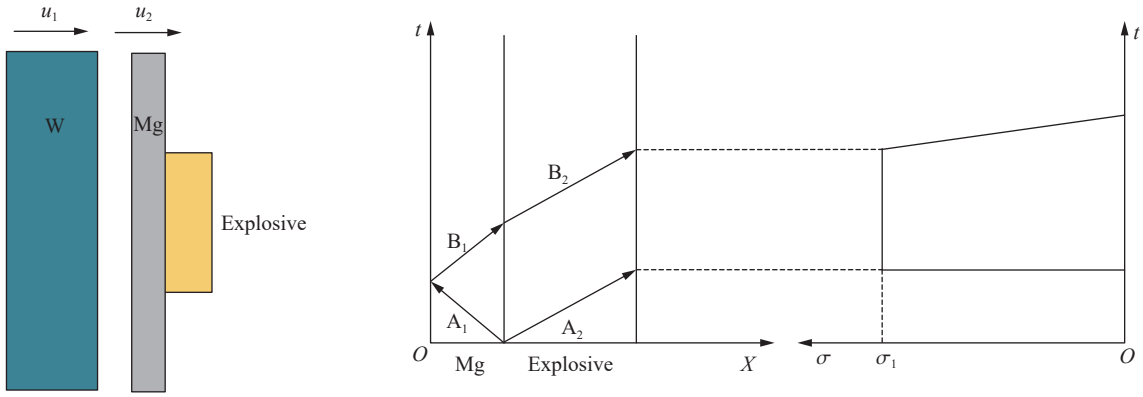
基于以往的多次冲击脱敏实验设计[11−13]，通常需要确保传入炸药内部的预冲击较弱而不足以起爆炸药，接着传入一个卸载波，然后是一个可以使炸药产生稳定爆轰的主冲击。基于爆轰驱动飞片加载原理，选择高阻抗钨合金飞片（简称钨飞片）以及与 TATB 基待测炸药阻抗相近的低阻抗镁合金飞片（简称镁飞片），通过炸药爆轰驱动两飞片先后撞击炸药进行加载。飞片发生碰撞和激波传播的动态过程大致分为 3 步：首先，如图 1 所示，受爆轰波驱动的钨飞片通过撞击驱动镁飞片，向镁飞片中传入冲击波 A_2，当 A_2 到达镁飞片后自由面时，将反射稀疏波 B_2，当 B_2 到达 W/Mg 界面时，由于镁飞片的阻抗低于钨飞片，导致镁飞片的整体速度高于钨飞片后界面的速度，两飞片发生分离，镁飞片以更高的击靶速度 u_2 向前飞行并撞击待测炸药；然后，如图 2 所示，镁飞片撞击炸药后，会在炸药中产生一个预冲击应力 σ_1，随后由镁飞片前表面反射的稀疏波传入炸药内部，使受到预冲击压缩后的炸药逐渐发生卸载；最后，如图 3 所示，钨飞片以速度 u_1（视为钨飞片的击靶速度）撞击镁飞片，并向炸药内部传入主冲击应力 σ_2，由于钨飞片的阻抗远高于镁飞片和炸药，因此，主冲击的载荷幅值也远高于预冲击[14−17]，最终对炸药形成冲击-卸载-再冲击加载。



(a) Flight diagram　　(b) Internal shock wave propagation

图 1　爆轰驱动钨飞片撞击镁飞片并发生脱离

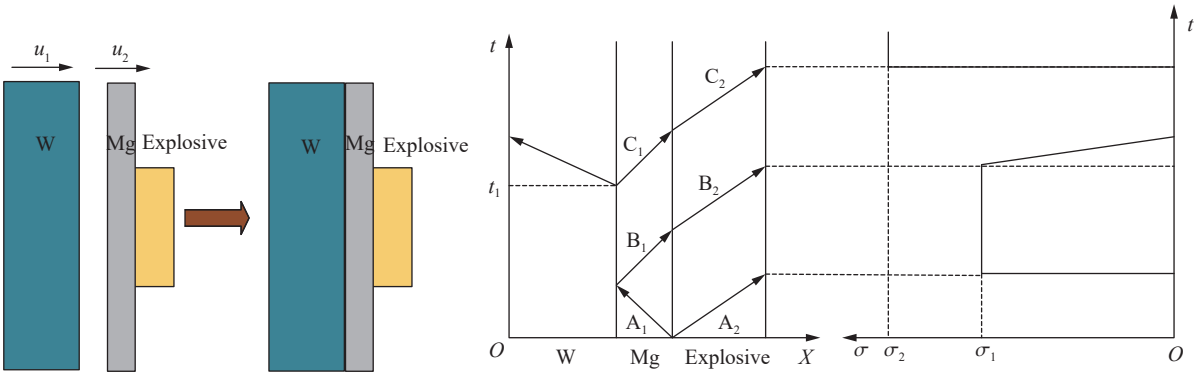
Fig. 1　Detonation drives the tungsten flyer to collide with the magnesium flyer and detach



(a) Flight diagram　　(b) Internal shock wave propagation

图 2　飞片撞击炸药传入预冲击和卸载波

Fig. 2　Flyer impacts explosives and transmits pre-shock and rarefaction wave



(a) Flight diagram　　(b) Internal shock wave propagation

图 3　钨飞片撞击镁飞片并向炸药内部传入主冲击

Fig. 3　Impact of the tungsten flyer on the magnesium flyer introduces the main shock into the explosive

1.2　加载装置设计

基于 1.1 节的加载原理，设计了如图 4 所示的加载装置。加载装置主要由雷管、平面波透镜、主装药、有机玻璃衰减层、钨飞片、镁飞片、样品支架以及外部钢套筒组成。通过雷管起爆⌀100 mm 的 37°平面波透镜，同步引爆⌀100 mm×30 mm 塑性黏结 HMX 基主装药产生稳定的平面爆轰波。平面爆轰波经过⌀100 mm×3 mm 有机玻璃衰减后，驱动⌀100 mm×4 mm 的钨飞片运动，然后穿过一定厚度的空气间隙，再通过碰撞驱动⌀100 mm×1 mm 的镁飞片，最后两飞片分离并以不同的速度先后撞击待测炸药，从而对待测炸药实现冲击-卸载-再冲击加载。

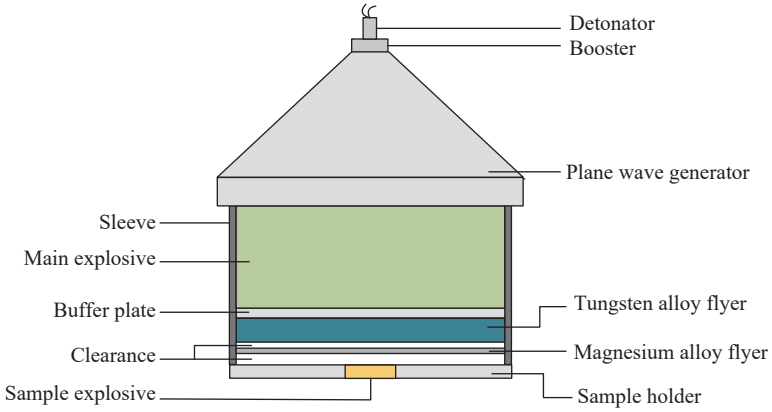


图 4　爆轰加载装置

Fig. 4　Explosive loading device

本研究选用塑性黏结 TATB 基钝感炸药作为待测炸药，根据其起爆阈值[18]，设计低幅值的预冲击应力 σ_1 约为 7 GPa，高幅值的主冲击应力 σ_2 约为 15 GPa，则根据阻抗匹配计算[19]，镁飞片的击靶速度 u_2 设计为 1.7 km/s 左右，钨飞片的击靶速度 u_1 设计为 1.1 km/s 左右。图 4 所示的爆轰加载装置中，主要材料尺寸参数已经通过理论设计确定，但钨飞片与镁飞片之间的间隙 1 和镁飞片与样品间的间隙 2 的宽度难以通过理论设计准确确定，而这两个间隙又对两飞片的击靶速度存在重要影响，因此，需要对该爆轰加载装置进行数值模拟，讨论不同间隙宽度条件下的飞片击靶速度，以使其趋近于预设飞片击靶速度，从而满足预设冲击幅值的要求，并通过数值模拟检验飞片的击靶平面性是否满足一维平面冲击实验要求。

2　数值模拟分析

通过自编可执行欧拉程序对 1.2 节中设计的爆轰加载装置进行二维数值模拟。考虑到炸药平面波

透镜的真实建模存在困难以及带来的不确定性，将平面波透镜等效为一定厚度的一维平面药柱进行计算。孙承纬[20]提出了用虚拟中心稀疏波确定平面波透镜有效药量的近似方法，虞德水等[15]通过大量数值模拟计算，发现将直径为 100 mm、37°平面波透镜等效为厚度为 10 mm 的 HMX 基塑性黏结主装药时，受驱动的飞片速度轨迹与实验结果吻合得最好。因此，在数值模拟中可以将直径为 100 mm、37°平面波透镜近似等效为 10 mm 厚的 HMX 基主装药。图 5 显示了该爆轰加载装置的简化计算模型。

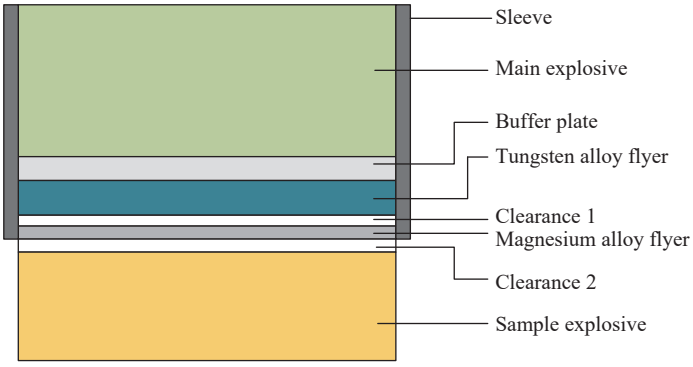


图 5　爆轰加载装置的简化计算模型

Fig. 5　Simplified calculation model for explosive loading device

主装药的爆轰产物、样品的未反应物及爆轰产物均采用 JWL 状态方程表示，其表达式为

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1\bar{v}}\right)\mathrm{e}^{-R_1\bar{v}} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2\bar{v}}\right)\mathrm{e}^{-R_2\bar{v}} + \frac{\omega}{\bar{v}}E \tag{1}$$

式中：$\bar{v}$为相对比容，E 为比内能，A、B、R_1、R_2 和 ω 为状态方程的参数。

外部钢套筒、有机玻璃衰减层及钨、镁飞片采用 Grüneisen 状态方程

$$p = \frac{\rho_0 C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a_0}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2} + (\gamma_0+a_0\mu)E \tag{2}$$

式中：C 为冲击波速度-粒子速度（u_s-u_p）曲线的截距（采用速度单位）；S_1、S_2、S_3 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数；γ_0为 Grüneisen 系数；a_0 为对γ_0的一阶体积修正；$\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1$，$\rho$ 为密度，ρ_0 为初始密度。

TATB 基高能钝感炸药采用点火增长反应模型

$$\dot{\lambda} = I(1-\lambda)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a\right)^x + G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z \tag{3}$$

式中：λ 为炸药反应度，I、a、b、c、d、e、g、z、x、G_1、G_2 为参数。

外部钢套筒和钨、镁飞片采用 Steinberg-Guinan-Lund 本构模型

$$Y = \frac{Y_0(1+\beta\varepsilon)^n G}{G_0} \tag{4}$$

$$G = G_0\left[1+A_0 p\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{-\frac{1}{3}} - B_0(T-T_0)\right] \tag{5}$$

式中：Y 为屈服强度，G 为剪切模量，Y_0 和 G_0 分别为初始屈服强度和初始剪切模量，β 为硬化系数，ε为应变，n 为硬化指数，A_0 为剪切模量硬化系数，B_0 为温度软化系数，T 为材料温度，T_0 为初始温度。

具体参数如表 1、表 2、表 3、表 4、表 5 所示。其中：D_CJ 为 CJ 爆速，p_CJ 为 CJ 爆轰压力，c_V 为比定容热容。

表 1　炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数

Table 1　JWL EOS parameters of explosive product

Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	D_{CJ}/(km·s^{-1})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
Main explosive	1.849	8.712	35.2	842.040	21.810	4.600 0	1.350 0	0.28
Sample explosive	1.895	7.640	26.9	666.486	5.339	4.548 3	0.797 6	0.35

表 2　样品未反应物的 JWL 状态方程参数

Table 2　JWL EOS parameters of unreacted sample

ρ_0/(g·cm^{-3})	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.895	77 810	−5.031	11.3	1.13	0.909 38

表 3　材料的 Grüneisen 状态方程参数

Table 3　Grüneisen EOS parameters of material

Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	C/(km·s^{-1})	S_1	γ_0	c_V/(J·g^{-1}·K^{-1})
PMMA	1.186	2.300	1.750	0.91	3.016
W	18.300	4.030	1.237	1.67	0.135
Mg	1.776	4.490	1.242	1.54	1.025
Steel	7.896	4.569	1.490	2.17	0.446

表 4　炸药样品点火增长反应模型参数

Table 4　Ignition and growth of reaction model parameters for sample explosive

ρ_0/(g·cm^{-3})	I/ms^{-1}	a	b	c	d	e
1.895	4×10^6	0.214	0.667	0.667	1.0	0.667
g	x	y	z	G_1/(GPa^{-2}·ms^{-1})		G_2/(GPa^{-1}·ms^{-1})
0.667	7.0	3.0	1.0	0.461 3		0.3

表 5　材料的 Steinberg-Guinan-Lund 本构模型参数

Table 5　Steinberg-Guinan-Lund constitutive model parameters of the material

Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	Y_0/GPa	β	G_0/GPa	A_0/Pa	B_0	n
Mg	1.78	0.19	1 100.0	16.5	1.03×10^{-2}	5.907	0.350
W	18.30	1.87	7.7	145.0	1.03×10^{-3}	1.764	0.300
Steel	7.90	0.34	43.0	77.0	2.26×10^{-3}	5.280	0.283

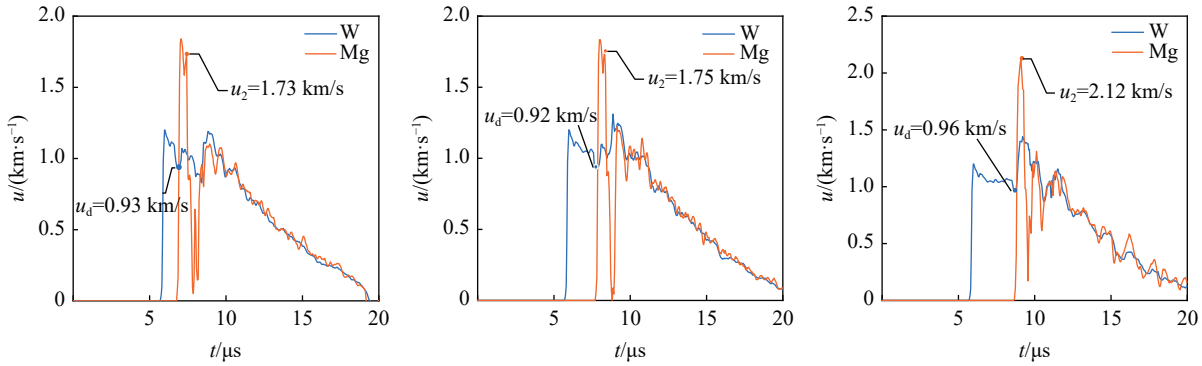
2.1　不同间隙宽度下飞片击靶速度分析

2.1.1　间隙 1 对飞片击靶速度的影响

受炸药爆轰驱动后，钨飞片穿过间隙 1 与镁飞片发生碰撞，驱动镁飞片运动。因此，间隙 1 影响着钨飞片撞击镁飞片的驱动速度，从而影响镁飞片的击靶速度，最终决定预冲击应力的幅值。通过控制变量法，对间隙 1 宽度分别为 1、2、3 mm 时的飞片速度进行数值模拟，其中间隙 2 的宽度设为 1 mm。

图 6 给出了间隙 1 宽度分别为 1、2、3 mm 时两飞片的后自由面速度-时间曲线。当间隙 1 宽度较小时，钨飞片在爆轰驱动下的速度增长有限，间隙 1 宽度分别为 1 和 2 mm 时，钨飞片撞击镁飞片的驱动速度 u_d 约为 0.93 km/s，导致镁飞片的击靶速度 u_2 约为 1.73 km/s，符合预设的镁飞片击靶速度。当间隙宽度逐渐增大到 3 mm 时，钨飞片受爆轰驱动速度持续增大，其撞击镁飞片的驱动速度变大，导致撞击后镁飞片的击靶速度 u_2 增大到 2.12 km/s，远高于预设的镁飞片击靶速度。可以发现，随着间隙 1 宽

度的增大，钨飞片在爆轰产物的持续驱动下速度逐渐增大，导致镁飞片的击靶速度增大，预冲击应力的幅值增大。过大的预冲击应力幅值将导致炸药直接起爆，从而不满足冲击-卸载-再冲击实验对低幅值预冲击的要求。因此，通过上述模拟分析可知，可以调整间隙 1 的宽度以控制镁飞片的击靶速度，从而控制预冲击载荷幅值的大小。基于对镁飞片击靶速度的预先设计，将实验装置的间隙 1 宽度设置为 1 mm。



(a) 1 mm　(b) 2 mm　(c) 3 mm

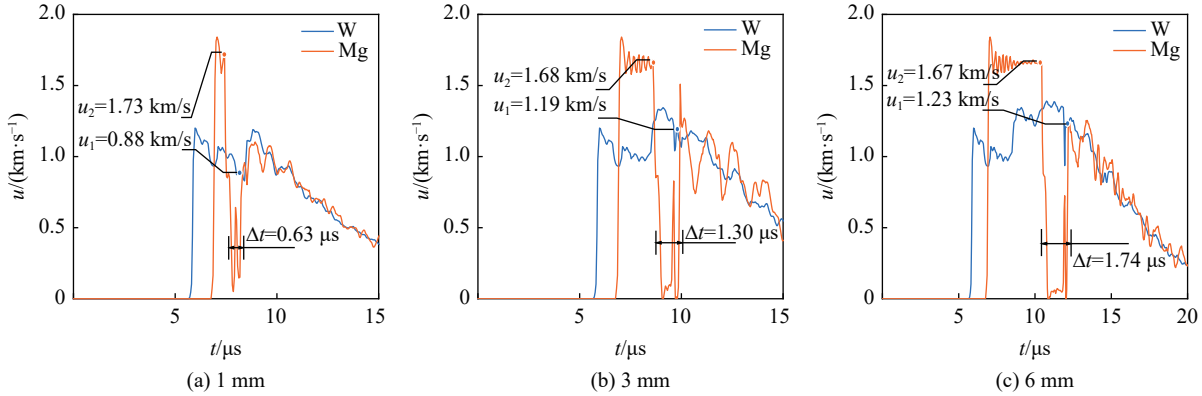
图 6　不同间隙 1 宽度下两飞片的后自由面速度

Fig. 6　Back free surface velocities of two flyers for different gaps 1

2.1.2　间隙 2 对飞片击靶速度的影响

当钨飞片撞击驱动镁飞片运动后，镁飞片将以一个较高的速度匀速穿过间隙 2 后击靶，而钨飞片在间隙 2 中受到爆轰产物的持续驱动，在达到极限运动速度之前，其速度会逐渐增大，因此，间隙 2 影响着钨飞片的击靶速度和击靶时间，决定了主冲击的幅值和卸载波的时间宽度。

通过控制变量法，在间隙 1 宽度设定为 1 mm 的情况下，分别模拟了间隙 2 宽度为 1、3、6 mm 时的爆轰加载情况。图 7 给出了间隙 2 宽度分别为 1、3、6 mm 时飞片的后自由面速度-时间曲线。可以看出，镁飞片的击靶速度基本不受间隙 2 宽度的影响，激波在镁飞片内部来回反射导致其后自由面速度不断发生振荡，最终击靶速度 u_2 逐渐稳定在约 1.67 km/s。随着间隙 2 宽度的增大，钨飞片在爆轰产物的持续驱动下速度逐渐增大，导致钨飞片的击靶速度 u_1 增大，从而导致主激波幅值增大。另外，当间隙 2 的宽度增大时，两飞片的相对距离增加，在镁飞片击靶后，钨飞片需要飞行更长的时间才能击靶，导致预冲击与主冲击之间卸载波的时间宽度增大。由上述模拟分析可知，可以通过调整间隙 2 的宽度来控制主冲击的幅值和卸载波的宽度，基于对钨飞片击靶速度的预先设计，将实验装置的间隙 2 宽度设置为 3 mm，此时预冲击和卸载波的时间宽度之和（Δt）为 1.30 μs。



(a) 1 mm　(b) 3 mm　(c) 6 mm

图 7　不同间隙 2 宽度下两飞片的后自由面速度

Fig. 7　Back free surface velocities of two flyers for different gaps 2

2.2　样品受载分析

通过对不同间隙下钨镁飞片击靶速度进行分析，针对样品为 TATB 基钝感炸药的情况，最终确定该爆轰加载实验装置间隙 1 的宽度为 1 mm，间隙 2 的宽度为 3 mm。模拟得到受载样品内部 2 mm 深度处的粒子速度（u_e）曲线如图 8 所示，样品首先受到粒子速度为 0.80 km/s 的预冲击，随后发生完全卸载，卸载时间宽度 Δt_r 为 0.89 μs，最后受到粒子速度为 1.40 km/s 的主冲击。遗憾的是，由于镁飞片发生了层裂导致样品受到额外的一次预冲击-卸载。

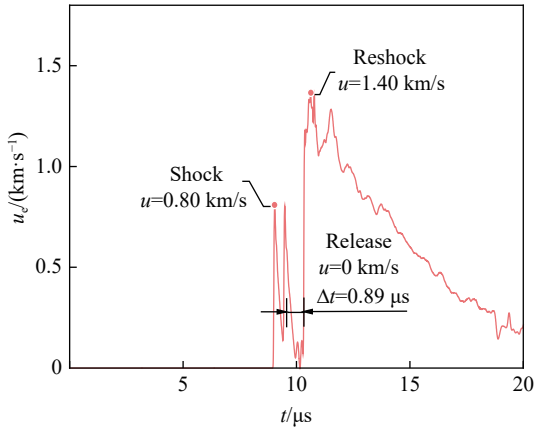


图 8　冲击-卸载-再冲击加载下样品内部粒子速度曲线

Fig. 8　Particle velocity history inside the sample under shock-release-reshock

2.3　飞片平面性分析

为了满足一维平面冲击实验的要求，还需要考察飞片击靶的平面性。图 9 给出了该爆轰加载装置驱动两飞片撞击炸药表面时不同时刻的冲击波压力模拟结果。可以看出，预冲击在⌀70 mm 范围内维持良好的一维平面性，主冲击则在⌀50 mm 范围内维持良好的一维平面性，综合来看，该爆轰加载装置可以视为在⌀50 mm 的冲击范围内都属于一维平面冲击，满足一般性的爆轰加载实验测试区间的要求。

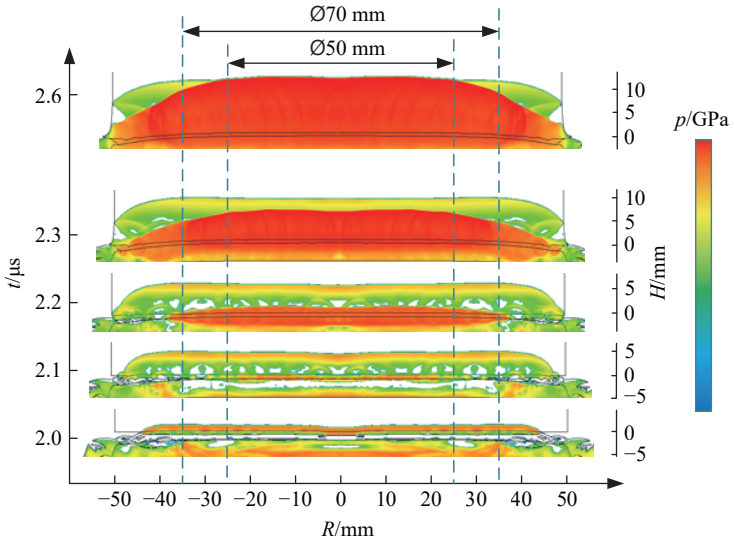


图 9　飞片撞击炸药表面时不同时刻的冲击波压力

Fig. 9　Pressure contour of shock waves generated by flyers impacting the surface of explosives at different time

3　验证实验

为了检验所建立的数值模型的准确性和爆轰加载装置的有效性，对第 2 节中设计的爆轰加载装置进行验证实验，实验参数如表 6 所示。实验采用光子多普勒测速仪（photon Doppler velocimetry，PDV）测量钨镁飞片在⌀30 mm 和⌀50 mm 范围的飞片速度，通过与数值模拟结果的对比来检验数值模型的准确性；选用⌀20 mm×2 mm 的 TATB 基药片作为待测样品，通过 PDV 测量炸药后表面的粒子速度，以观察炸药内部是否受到冲击-卸载-再冲击加载。PDV 测试探针布置如图 10 所示，其中探针 1 位于待测样品中心，用于测量炸药后表面的粒子速度，探针 4、5、6、7 用于测量钨飞片在⌀30 mm 和⌀50 mm 范围的多点速度，探针 2、3、8、9 用于测量镁飞片在⌀30 mm 和⌀50 mm 范围的多点速度。

表 6　验证实验装置参数

Table 6　Device parameters for the confirmation experiment

Part	ρ_0/(g·cm^{-3})	Size
Plane wave generator		⌀100 mm, 37°
HMX-based main explosive	1.849	⌀100 mm×30 mm
Buffer plate	1.186	⌀100 mm×3 mm
Tungsten alloy flyer	18.300	⌀100 mm×4 mm
Clearance 1		1 mm
Magnesium alloy flyer	1.776	⌀100 mm×1 mm
Clearance 2		3 mm
TATB based sample explosive	1.895	⌀20 mm×2 mm
Sleeve		⌀110 mm×52 mm

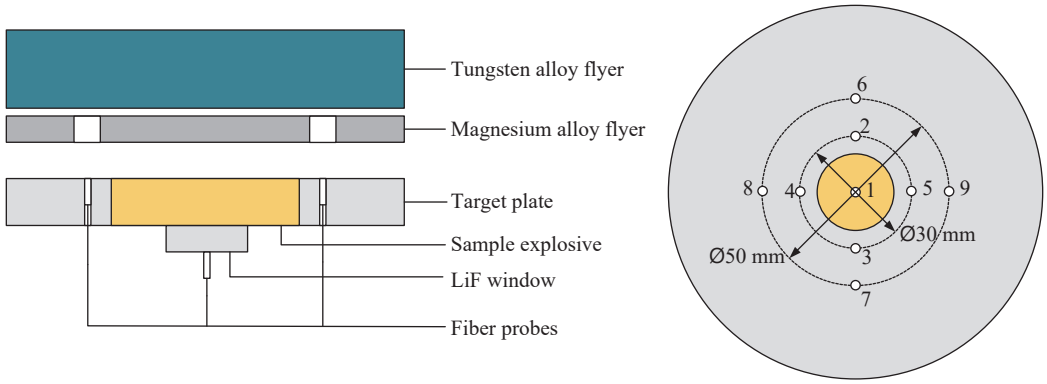
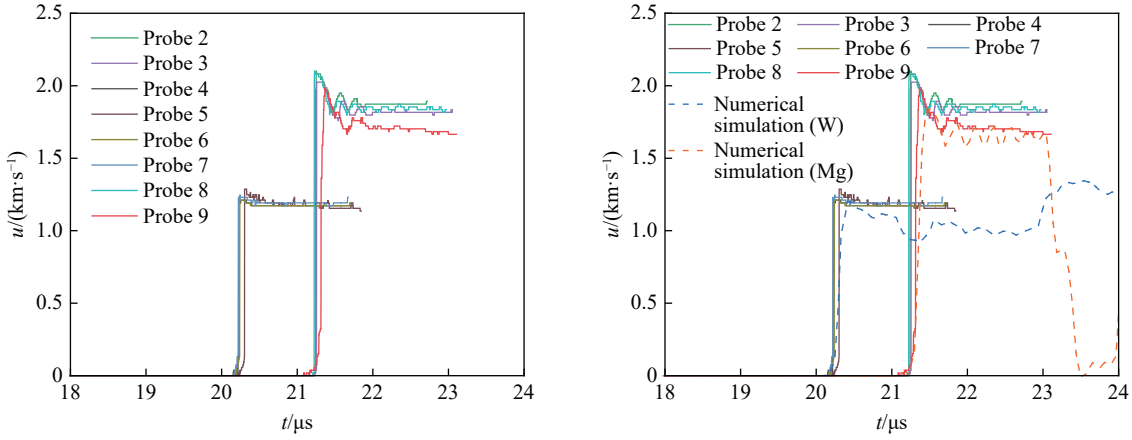


图 10　多点 PDV 探针布局

Fig. 10　Multipoint PDV probes layout

探针 2～9 测量的飞片速度曲线如图 11 所示。可以看出，受爆轰驱动后，钨飞片的运动速度为 (1.18±0.01) km/s，镁飞片的击靶速度为 (1.78±0.08) km/s，针对同一飞片在⌀30 mm 和⌀50 mm 范围上的多点测量表明，在该测试范围内，钨飞片速度的相对误差为 0.8%，镁飞片速度的相对误差为 4.5%，表明爆轰驱动下飞片在⌀50 mm 范围内保持良好的平面性，满足一维平面冲击实验的要求。数值模拟得到的钨飞片撞击镁飞片前后相对稳定的运动速度为 1.11 km/s，镁飞片的击靶速度为 1.68 km/s，实验测量与



(a) Experimental particle velocity history of the flyer

(b) Comparison between experimental results and numerical simulations

图 11　PDV 测量的飞片速度曲线

Fig. 11　Flyer velocity curves measured by PDV

数值模拟的相对误差在 6% 以内，两者符合程度较高，说明所建立数值模型的准确性较高，通过数值模拟对爆轰加载装置进行的仿真和参数设计是真实有效的。

探针 1 测量的 TATB 基待测炸药后表面的粒子速度如图 12 所示。在炸药-窗口界面处首先观察到传入一个粒子速度为 0.74 km/s 的预冲击；随后受到稀疏波作用，粒子速度逐渐卸载至接近零，卸载时间宽度为 0.97 μs；最后传入一个粒子速度为 1.70 km/s 的主冲击。炸药的整个受载荷历程与设计基本一致，说明本研究设计的爆轰加载装置可以对待测样品施加完全卸载的冲击-卸载-再冲击加载。需要注意的是，实验中也检测到了由于镁飞片层裂而产生的额外的预冲击-卸载，由于两次预冲击的时间间隔很短（0.25 μs），实验中仍可将其视为一个连续的预冲击-卸载过程。后续可通过调整飞片和缓冲层的厚度来克服层裂的影响。

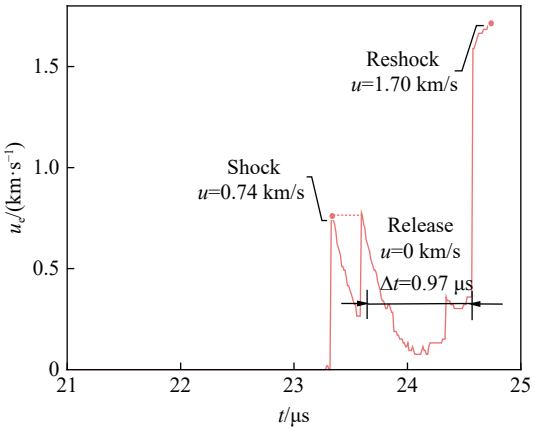


图 12　TATB 基炸药后表面的粒子速度

Fig. 12　Particle velocity on the back surface of the TATB-based explosive samples

4　结　论

基于爆轰驱动双层带间隙飞片进行加载的原理，分析了不同阻抗材料中冲击波的相互作用和飞片运动规律，提出并设计了一种可实现冲击-卸载-再冲击复杂载荷的爆轰加载实验装置。通过数值模拟对爆轰加载实验装置进行了仿真设计和主要参数优化，并结合实验验证了所设计的爆轰加载实验装置可以对待测样品施加完全卸载的冲击-卸载-再冲击载荷，得到以下主要结论。

(1) 在其他材料和参数确定的情况下，通过调整爆轰加载装置中的间隙 1 和间隙 2 的宽度来调整飞片的击靶速度和中间卸载波的时间宽度，可以实现对冲击波幅值以及卸载时间的调控，针对本研究中的 TATB 基待测炸药而言，最终确定间隙 1 的宽度为 1 mm，间隙 2 的宽度为 3 mm。

(2) 通过数值模拟对飞片击靶波形的分析和验证实验中对飞片运动速度的多点测量，证明该爆轰加载装置驱动飞片的击靶平面性良好，在⌀50 mm 范围内可以对待测样品实现一维平面冲击加载。

(3) 通过实验验证了所建立的数值模型和仿真分析的准确性，设计的爆轰加载装置可对待测样品实现完全卸载的冲击-卸载-再冲击加载历程，为炸药在复杂载荷多次冲击下起爆性能的研究提供了一种全新的更接近真实工程场景的加载手段。

参考文献：

[1] TARVER C M, URTIEW P A, TAO W C. Effects of tandem and colliding shock waves on the initiation of triaminotrinitrobenzene [J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(5): 3089–3095.

[2] 黄奎邦, 刘益儒, 洪滔, 等. TATB 基非均质炸药预冲击减敏的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(3): 032301.

HUANG K B, LIU Y R, HONG T, et al. Numerical simulation of pre-shock desensitization in TATB-based heterogeneous explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(3): 032301.

[3] CAMPBELL A W, DAVIS W C, RAMSAY J B, et al. Shock initiation of solid explosives [J]. Physics of Fluids, 1961, 4(4): 511–521.

[4] CAMPBELL A W, TRAVIS J R. Shock desensitization of PBX-9404 and composition B-3 [R]. NM, USA: Los Alamos National Laboratory, 1985.

[5] SETCHELL R E. Effects of precursor waves in shock initiation of granular explosives [J]. Combustion and Flame, 1983, 54(1/2/3): 171–182.

[6] BORDZILOVSKII S A, KARAKHANOV S M. Desensitization of pressed RDX/paraffin and HMX/paraffin compounds by multiple shock waves [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1995, 31(2): 227–235.

[7] BAT'KOV Y V, GLUSHAK B L, NOVIKOV S A. Desensitization of pressed explosive compositions based on TNT, RDX, and HMX under double shock-wave loading [J]. Combustion Explosion & Shock Waves, 1995, 31(4): 482–485.

[8] TARVER C M. Corner turning and shock desensitization experiments plus numerical modeling of detonation waves in the triaminotrinitrobenzene based explosive LX-17 [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2010, 114(8): 2727–2736.

[9] FINNEGAN S G, FERGUSON J W, GOFF M J, et al. Development of a flyer design to perform plate impact shock-release-shock experiments on explosives [J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1979(1): 100012.

[10] ASLAM T, GUSTAVSEN R, WHITWORTH N, et al. Shock, release and reshock of PBX 9502: experiments and modeling [J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1979(1): 100001.

[11] 訾攀登, 陈军, 张蓉, 等. 二次压缩条件下 JOB-9003 炸药特性研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 155–161.
ZI P D, CHEN J, ZHANG R, et al. Characteristics of JOB-9003 in double shocks experiments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 155–161.

[12] SOLLIER A, LEFRANCOIS A, JACQUET L, et al. Double-shock initiation of a TATB based explosive: influence of preshock pressure and duration on the desensitization effect [C]//16th International Detonation Symposium, 2019.

[13] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R, et al. Double shock initiation of the HMX based explosive EDC-37 [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 999–1002.

[14] 金柯. 爆轰驱动飞片运动数值模拟 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004: 40–52.
JIN K. Numerical simulation of detonation driven flyer motion [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004: 40–52.

[15] 虞德水, 赵锋, 谭多望, 等. JOB-9003 和 JB-9014 炸药平面爆轰驱动飞片的对比研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 140–144.
YU D S, ZHAO F, TAN D W, et al. Experimental studies on detonation driving behavior of JOB-9003 and JB-9014 slab explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 140–144.

[16] 金柯, 习锋, 杨慕松, 等. 化爆加载装置系列化设计 [J]. 含能材料, 2003, 11(3): 113–115.
JIN K, XI F, YANG M S, et al. Design of serialization explosive-loading device [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2003, 11(3): 113–115.

[17] 张万甲, 刘仓理. 可调控靶中应力波形的吉帕压力范围平面爆炸加载技术 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 91–96.
ZHANG W J, LIU C L. A planar explosive loading technique of GPa pressures and capable of adjusting the stress waves in targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 91–96.

[18] 夏先贵, 林其文, 李国珍. JB9014 炸药冲击起爆阈值的测定 [J]. 含能材料, 1996, 4(3): 117–122.
XIA X G, LIN Q W, LI G Z. Determination of shock initiation threshold of insensitive explosive JB9014 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1996, 4(3): 117–122.

[19] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 222–227.
WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 222–227.

[20] 孙承纬. 炸药平面波透镜的有效药量 [C]//爆轰研究论文集: 第 3 卷, 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998: 307–316.
SUN C W. Effective dosage of explosive planar wave lens [C]//Detonation Research Paper Collection: Volume 3, Mianyang: Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, 1998: 307–316.

Design and Simulation of Shock-Release-Reshock Experimental Device for TATB-Based Insensitive Explosives under Detonation Loading

FAN Hui, LIU Kun, GU Yan, SUN Zhanfeng

（*Institute of Fluid Physics*, *CAEP*, *Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*）

Abstract: In some engineering applications and accidents, the detonation performance of explosives may change if subjected to multiple shocks and releases. Therefore, an experimental loading device with multiple shocks and releases is needed in order to study the detonation response of explosives under complex loads. In this paper, an experimental detonation loading device that can achieve complete release of shock-release-reshock is proposed and designed. The device is optimized through numerical simulations, and the accuracy of the numerical simulation is validated by the corresponding experiments. The results indicate that the designed detonation loading device can achieve complete release of shock-release-reshock loading procesure of TATB-based insensitive explosives, where the detonation loading device drives tungsten magnesium double-layer flyers. The design provides a new experimental technique for further study on the detonation response of explosives under complex loads and multiple shocks.

Keywords: shock-release-reshock; detonation loading; TATB-based insensitive explosive